

A16

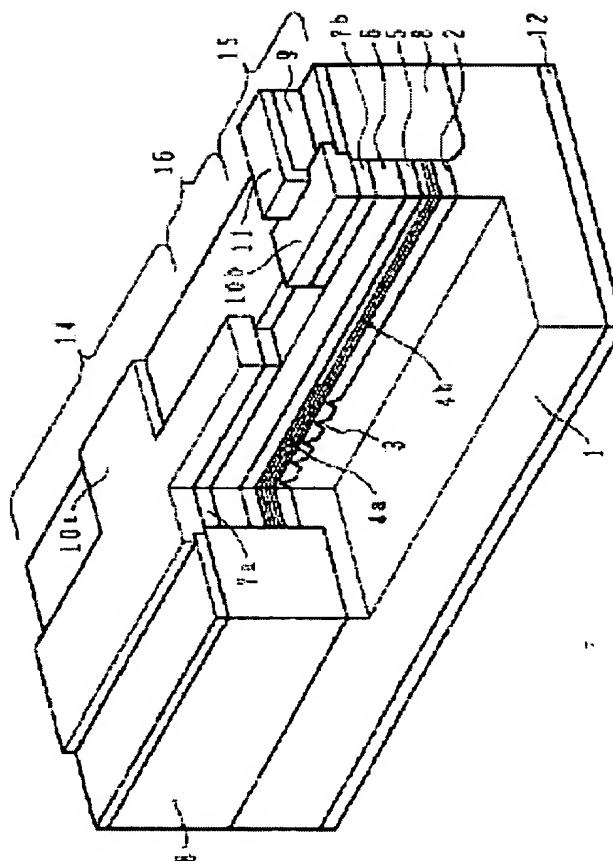
OPTICAL SEMICONDUCTOR DEVICE

Patent number: JP9222588
Publication date: 1997-08-26
Inventor: SAWARA RICHIIYAADO; MATSUDA MANABU
Applicant: FUJITSU LTD
Classification:
- international: G02F1/015; H01L27/15
- european:
Application number: JP19960028259 19960215
Priority number(s): JP19960028259 19960215

Abstract of JP9222588

PROBLEM TO BE SOLVED: To obtain an optical modulator which has the α parameter suitable for long-distance transmission and is low in the insertion loss at the time of a transmissible state by constituting the optical modulator with a quantum box for confining three-dimensional quanta.

SOLUTION: Diffraction gratings 3 are formed on part of the surface of an n-type InP substrate 1 and an n-type layer 2 is formed on this substrate 1. A distribution feedback type (DFB) laser 14 and the optical modulator 15 are formed thereon by interposing a separating region 16 therebetween. The DFB laser 14 is formed by laminating an n-type clad layer 2, an active layer 4a, a p-type clad layer 5, a p-type layer 6 and a contact layer 7a on the diffraction gratings 3. The optical modulator 15 is formed by laminating a modulation absorptive layer 4b including a quantum box on the n-type layer 2 and laminating p-type layers 5, 6 and p-type contact layer 7b thereon. A polyimide region 9 is formed on the periphery of the p-side electrode 10b and a wiring layer 11 formed thereon is connected to the p-side electrode 10b. Further, an n-side electrode 12 is commonly formed on the rear surface of the substrate 1.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

BEST AVAILABLE COPY

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-222588

(43) 公開日 平成9年(1997)8月26日

(51) Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 2 F 1/015	5 0 5		G 0 2 F 1/015	5 0 5
H 0 1 L 27/15			H 0 1 L 27/15	B

審査請求 未請求 請求項の数6 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願平8-28259

(22) 出願日 平成8年(1996)2月15日

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番
1号

(72) 発明者 佐原 リチャード

神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地
富士通株式会社内

(72) 発明者 松田 学

神奈川県川崎市中原区上小田中1015番地
富士通株式会社内

(74) 代理人 弁理士 高橋 敬四郎

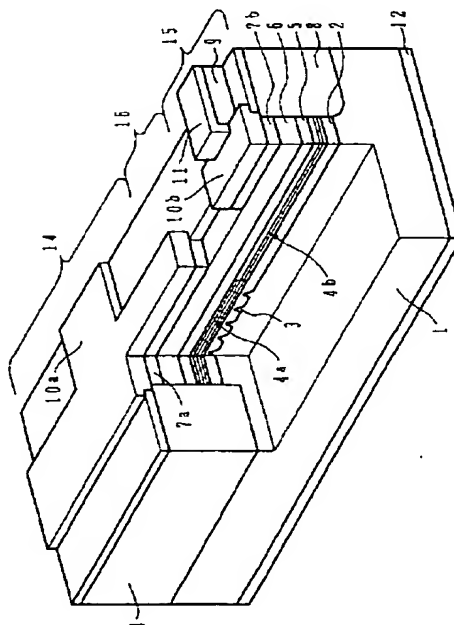
(54) 【発明の名称】 光半導体装置

(57) 【要約】

【課題】 長距離伝送に適した α パラメータを有する光半導体装置を提供する。

【解決手段】 光を放出する発光手段と、前記発光手段から放出された光の光路中に配置され、電子及び正孔に対して3次元量子閉じ込めを行う量子箱と、前記量子箱に電界を印加する電界印加手段とを有する。

MIDF8レーザ



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光を放出する発光手段と、
前記発光手段から放出された光の光路中に配置され、電子及び正孔に対して3次元量子閉じ込めを行う量子箱と、
前記量子箱に電界を印加する電界印加手段とを有する光半導体装置。

【請求項2】 電界無印加時において、前記量子箱に閉じ込められた電子及び正孔の各波動関数のピークを与える空間座標が3次元的に一致し、
前記発光手段から放出される波長の光に関して、前記量子箱に電界を印加している時の前記量子箱による光吸収強度が、電界を印加していない時の光吸収強度よりも小さい請求項1に記載の光半導体装置。

【請求項3】 前記発光手段により放出される光の波長が、前記量子箱による光吸収スペクトルのピークのうち最も長波長側のピークに対応する波長に、そのピークの半値幅の1/2を加えた波長よりも短い請求項1または2に記載の光半導体装置。

【請求項4】 前記発光手段により放出される光の波長が、前記量子箱に電界を印加していない時における該量子箱の光吸収スペクトルのいずれかのピークの半値幅の範囲内の波長である請求項1または2に記載の光半導体装置。

【請求項5】 電界無印加時において、前記量子箱に閉じ込められた電子及び正孔の各波動関数のピークを与える空間座標が、前記電界印加手段によって印加される電界の方向に関してずれており、
前記発光手段から放出される波長の光に関して、前記量子箱に電界を印加している時の前記量子箱による光吸収強度が、電界を印加していない時の光吸収強度よりも大きい請求項1に記載の光半導体装置。

【請求項6】 前記発光手段により放出される光の波長が、前記量子箱に電界を印加していない時における該量子箱の光吸収スペクトルの相互に隣り合うピークの中間の波長である請求項5に記載の光半導体装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光半導体装置に関し、特に印加電界によって光吸収強度を変化させて光変調を行う光半導体装置に関する。

【0002】

【従来の技術】狭いバンドギャップの半導体の薄層を広いバンドギャップの半導体の層で挟むと量子井戸構造を形成することができる。単一の半導体薄層が電子と正孔の両者に対する量子井戸を形成する場合をタイプIの量子井戸と呼ぶ。この場合、狭バンドギャップの半導体層を井戸（ウェル）層と呼び、広バンドギャップの半導体層を障壁（バリア）層と呼ぶ。狭バンドギャップの半導体層と広バンドギャップの半導体層とを交互に積層する

と、タイプIの多重量子井戸構造が形成される。

【0003】また、電子に対する量子井戸を第1の半導体層で形成し、隣接して正孔に対する量子井戸を第2の半導体層で形成し、電子および正孔に対して障壁を形成する第3の半導体層でサンドイッチした構造をタイプIIの量子井戸と呼ぶ。この場合、第1及び第2の半導体層の積層構造を井戸層と呼び、第3の半導体層を障壁層と呼ぶ。第1の半導体層、第2の半導体層、必要に応じて第3の半導体層を順次積層するとタイプIIの多重量子井戸が形成される。

【0004】タイプIまたはタイプIIの量子井戸構造の井戸層を傾斜バンドギャップ材料で形成し、プリバイアスの作用を持たせたグレーテッドバンドギャップ量子井戸、複数のタイプIの量子井戸層をキャリアがトンネル可能な薄い障壁層を介して結合した結合量子井戸、結合量子井戸で超格子を形成し、多数の井戸層に共通の状態と単一井戸層のみに起因する状態を発生させた結合超格子等も知られている。

【0005】このような量子井戸構造ないし多重量子井戸構造は種々の半導体装置に利用することができる。たとえば、電子や正孔は井戸層においてより安定な状態となることを利用し、タイプIの多重量子井戸構造を用いた半導体レーザが製作されている。

【0006】光通信の分野においては、光源および変調器の重要性が高い。レーザ光源の駆動自体をオン/オフして出力光を変調することもできるが、出力波長の安定性が悪く、いわゆるチャージングが生じる。光波長を安定に保持し、高速の変調を行うためには、レーザ光源を連続発振させ変調器で変調を行うことが好ましい。量子井戸構造を用いた変調器の開発が行なわれている。

【0007】図13A、13Bは、タイプIの量子井戸構造の例を示す。図13Aは、タイプIの量子井戸のバンドエネルギー分布を厚さ方向の位置の関数として示す。InP基板上に、p型層、量子井戸構造、n型層が積層され、pin構造を形成している。量子井戸構造内の障壁層L1、L3は、 $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.49}\text{P}_{0.51}$ で形成され、InP基板に対し、-0.31%の伸長歪を有する。この障壁層L1の伝導帯のバンド端のエネルギー位置は-8.173eVであり、価電子帯のヘビーホールのバンド端のエネルギー位置は-9.228eVであり、ライトホールのバンド端のエネルギー位置は-9.206eVである。

【0008】井戸層L2は、+1.32%の圧縮歪を有する $\text{In}_{0.89}\text{Ga}_{0.11}\text{As}_{0.65}\text{P}_{0.35}$ で形成され、伝導帯のバンド端のエネルギー位置は-8.344eV、価電子帯のヘビーホールのバンド端のエネルギー位置は-9.138eV、ライトホールのバンド端のエネルギー位置は-9.221eVである。井戸層L2の厚さは、たとえば9.0nmである。なお、井戸層L2及びそれに隣接する障壁層L1、L3の領域はノンドープである。

【0009】なお、単一の井戸層のみを示したが、井戸層L2と障壁層L1（L3）を交互に配置し、多重量子井戸としてもよい。このような構成により、電子に対する量子井戸と正孔に対する量子井戸とが同一層内に形成されるタイプ1の量子井戸構造が形成される。

【0010】このようなp-i-n構造に対し、バイアス電界を印加しない状態においては、伝導帯の電子の波動関数も価電子帯の正孔の波動関数も井戸層L2を中心として分布する。電子の波動関数のピークと正孔の波動関数のピークとは一致する。量子井戸構造に井戸層L2のバンドギャップに相当するエネルギーの光子エネルギーを有する光を入射すると、電子正孔対を生じ、光が吸収される。

【0011】また、電子及び正孔を1次元方向にのみ閉じ込めているため、バンド端近傍のエネルギー準位がほぼ連続的に分布する。従って、井戸層L2のバンドギャップに相当するエネルギー以上の光子エネルギーを有する光に対しても電子正孔対を生じ、光吸収強度が大きくなる。従って、量子井戸構造に入射する光の波長を、井戸層L2のバンドギャップに相当する波長よりも長い波長から徐々に短くしていくと、始めは光吸収強度がほぼ0であり、バンドギャップに相当する波長で立ち上がり、それよりも短い波長に対して大きな光吸収強度を示す。

【0012】図13Bは、図13Aに示す量子井戸構造にバイアス電界を印加した時の波動関数の分布を示す。電子および正孔は電界により力を受け、その波動関数の分布を変化させる。

【0013】図中、4段に分けて電界強度の極性および強度の異なる4つの場合について電子および正孔の波動関数の分布が示されている。図中、実線は電子の波動関数を示し、点線は正孔（ヘビーホール）の波動関数を示す。なお、図13Aに示すように、この量子井戸構造は厚さ方向に関して対称的であり、波動関数の分布は正極性の電界印加と負極性の電界印加に対し、対称的な形状を示している。

【0014】積層方向に沿って電界が印加されると、正孔は電界方向に移動し、電子は電界と逆方向に移動する。このため、印加電界がない時にはピーク位置が一致していた電子と正孔の波動関数は、電界強度の増加と共に反対方向に移動し、その重なりが減少している。波動関数の重なりが減少することは、光吸収強度の低下を意味する。波動関数の重なり度の2乗が、遷移確率すなわち振動子強度に比例し、光吸収強度を表す。

【0015】なお、電界印加によって図13Aに示すバンド構造は傾斜する。井戸層L2のバンドがたとえば右下がりに傾斜すると電子は右側に、正孔は左側に偏って分布する。したがって、電子正孔対を発生させるのに必要なエネルギーはバンドが傾いた分減少し、吸収光波長は長波長側に移動（レッドシフト）する。

【0016】図14は、図13Aに示すタイプ1の量子

井戸構造の光吸収スペクトルの例を示す。横軸は波長を単位nmで表し、縦軸は入射光の減衰量を単位dBで表す。すなわち、縦軸は量子井戸構造の光吸収強度に対応する。

【0017】電界無印加時には、光吸収強度が波長約1480nmにおいて極大となり、波長が長くなるに従って減少する。波長が1560nm以上の領域で光吸収強度がほとんど0になる。波長が1480nmより短くなくても、比較的大きな光吸収強度を維持する。

【0018】強さ-50kV/cmの電界を印加すると、吸収ピークが長波長側へシフトし、波長約1495nm近傍に弱い吸収ピークが現れる。電界印加により電子と正孔の波動関数の重なりが減少するため、吸収ピークの高さは低くなる。また、電界印加により、波長約1500nm以上の領域において、電界無印加時よりも光吸収強度が増大する。この光吸収強度の変化を利用して光変調を行うことができる。

【0019】次に、図15を参照して、 α パラメータと光パルス信号の最大伝送距離との関係について説明する。光パルス発生源の α パラメータは、

【0020】

$$\text{【数1】 } \alpha = \Delta\theta / \Delta A_m = \Delta n / \Delta A_b$$

と定義される。ここで、 $\Delta\theta$ は光パルスの位相変化、 ΔA_m は振幅の変化、 Δn は光変調器の屈折率の変化、 ΔA_b は光変調器の光吸収強度の変化を表す。

【0021】図15は、 α パラメータと最大伝送距離との関係を示す。横軸は α パラメータを表し、縦軸は伝送距離を単位kmで表す。伝送媒体を分散係数17pS/nm/kmの光ファイバ、光パルス信号の周波数を10Gb/s、光パルス波形をガウシアン波形、パワーペナルティを1dBとした。

【0022】 α パラメータが約-1のとき、最大伝送距離が最大値を示し、 α パラメータを正の向きに大きくすると最大伝送距離が急激に短くなり、負の向きに大きくすると徐々に短くなる。従って、長距離伝送を行うためには、 α パラメータを負にすることが好ましく、-2~0とすることがより好ましい。

【0023】図16は、図14に示す特性を有する量子井戸構造の、光吸収強度変化、屈折率変化、及び α パラメータの波長依存性を示す。横軸は波長を単位nmで表し、左縦軸は光吸収強度変化 ΔA_b を任意目盛りで表し、右縦軸は屈折率変化 Δn と α パラメータを表す。図中の実線は光吸収強度変化 ΔA_b を示し、記号■は屈折率変化 Δn を示し、記号○は α パラメータを示す。屈折率変化 Δn は、クラマースクローニツヒの式を用いて計算したものである。

【0024】長距離伝送を行うためには、光変調器の挿入損失を少なくするために、光透過状態の時に光変調器の光吸収強度がほぼ0であることが好ましい。従って、図14の特性を有する量子井戸構造を用いた光変調器

は、光吸収強度の観点から、1560 nm以上の波長域の光の変調に適している。しかし、図16において、波長1560 nm以上の波長域で α パラメータが正になっている。 α パラメータの観点からは、この波長域は長距離伝送に適さない。

【0025】また、1500～1530 nmの波長域において α パラメータが負になるため、 α パラメータの観点からは、この光変調器は1500～1530 nmの波長域の光の変調に適している。しかし、図14からわかるように、この波長域の光吸収強度が比較的大きいため、光吸収強度の観点からは、この光変調器は1500～1530 nmの波長域の光の変調に適さない。このように、1次元閉じ込めを行うタイプIの量子井戸構造を用いた光変調器は、光吸収強度と α パラメータ共に長距離伝送のために好適な値になる波長域を有しない。

【0026】図17A、17Bは、タイプIIの量子井戸を示す。図17Aは、タイプIIの量子井戸のバンドエネルギー分布を厚さ方向の位置の関数として示す。図において、障壁層M1、電子に対する井戸層M2、正孔に対する井戸層M3、障壁層M4が積層し、タイプIIの量子井戸構造を構成している。なお、障壁層M1側にはp型層が連続し、障壁層M4側にはn型層が連続する。

【0027】電子に対する井戸層を構成する層M2と正孔に対する井戸層を構成する層M3は隣接して配置されており、その両側には障壁層M1、M4が配置されている。なお、多重井戸構造とする場合には、層M1と層M4は同一の層で構成される。

【0028】たとえば、この量子井戸構造はInP基板上に形成され、層M1(M4)は $\text{In}_{0.73}\text{Ga}_{0.27}\text{As}_{0.49}\text{P}_{0.51}$ で形成された伸長歪-0.31%の層であり、伝導帯のバンド端のエネルギー位置は-8.173 eV、価電子帯のヘビーホールバンド端のエネルギー位置は-9.228 eV、価電子帯のライトホールバンド端のエネルギー位置は-9.206 eVである。

【0029】電子に対する井戸層M2は、たとえば厚さ9.0 nmの $\text{InAs}_{0.43}\text{P}_{0.57}$ で形成され、圧縮歪+1.37%を有する。伝導帯のバンド端のエネルギー位置は-8.295 eV、価電子帯のヘビーホールバンド端のエネルギー位置は-9.220 eV、価電子帯のライトホールバンド端のエネルギー位置は-9.307 eVである。

【0030】正孔に対する量子井戸を構成する層M3は、たとえば厚さ12.0 nmの $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}_{0.71}\text{P}_{0.29}$ で形成され、伸長歪-1.0%を有する。この層の伝導帯のバンド端のエネルギー位置は-8.169 eV、価電子帯のヘビーホールバンド端のエネルギー位置は-9.178 eV、価電子帯のライトホールバンド端のエネルギー位置は-9.105 eVである。

【0031】図17Bは、図13Bと同様、印加電界に対する波動関数の移動を示している。タイプIIの量子

井戸においては、電界を印加しない状態においても電子の量子井戸の位置と正孔の量子井戸の位置が異なるため、電子と正孔の波動関数は離れて存在する。なお、両量子井戸層の厚さが波動関数の広がりと比較、同等以下である場合には、波動関数は障壁層に侵入して分布する。

【0032】電子と正孔が互いに離れる方向の電界を印加すると、図17B中、上2段のグラフに示すように、電子の波動関数と正孔の波動関数はさらに離れて分布する。これに対し、電子と正孔が近づく方向の電界を印加すると、電子および正孔の波動関数は両量子井戸層の境界側に偏り、さらに障壁層内に進入し、波動関数の重なりは増大する。

【0033】また、図17Aにおいて、バンド構造が左下がりになるような電界を印加すると、電子の波動関数と正孔の波動関数は離れるように分布する。この場合、バンドの傾きに対応する分、遷移エネルギーが減少し、遷移波長は長波長側に移動(レッドシフト)する。

【0034】また、電子の波動関数と正孔の波動関数が近づく方向の(右下がりになる)電界を印加すると、境界におけるバンドギャップは変化しないが、井戸層底部のバンド端のエネルギーに傾きが生じるため、波動関数の分布が境界付近に集まり、実効的井戸幅が減少する作用が生じる。遷移エネルギーは僅か増加する。この遷移エネルギーの増加は、遷移波長の短波長化(ブルーシフト)となる。

【0035】従来、量子井戸構造を光変調器に用いる場合、電界印加による遷移波長のレッドシフトを利用して、電界無印加時の光吸収端エネルギーよりわずかに長波長の光を入力光とする。電界印加によってレッドシフトが生じると光吸収端波長は長波長側に移動する。その結果、透明領域であった入力光の波長が吸収領域の波長となる。このように、電界印加により遷移波長をレッドシフトさせ、電界印加時の光吸収を利用して光変調を行うと、 α パラメータが正になるため、この方法は長距離伝送に適さない。

【0036】電界無印加時の光吸収端エネルギーより短波長側の波長域は、電界無印加時及び電界印加時共に吸収領域となるため、この波長域の光を被変調光として使用することは好ましくない。

【0037】

【発明が解決しようとする課題】上述のように、1次元閉じ込めを行う量子井戸構造を用いた光変調器では、電界印加により遷移波長をレッドシフトさせ、電界印加時の光吸収を利用して光変調を行うため、 α パラメータが正になり長距離伝送に適さない。

【0038】本発明の目的は、長距離伝送に適した α パラメータを有する光半導体装置を提供することである。

【0039】

【課題を解決するための手段】本発明の一観点による

と、光を放出する発光手段と、前記発光手段から放出された光の光路中に配置され、電子及び正孔に対して3次元量子閉じ込めを行う量子箱と、前記量子箱に電界を印加する電界印加手段とを有する光半導体装置が提供される。

【0040】量子箱内では、伝導帯と価電子帯にエネルギー準位が離散的に分布する。伝導帯のエネルギー準位と価電子帯のエネルギー準位との差に等しいエネルギーの光が入射すると、電子正孔対が生成され光吸収が起こる。離散的に分布するエネルギー準位に対応し、光吸収スペクトルの吸収ピークも離散的に現れる。量子箱に電界を印加するとエネルギー準位間のエネルギー差が変動するため、吸収ピークが長波長または短波長側へシフトする。

【0041】量子箱に、吸収ピークのシフト範囲内の波長域の光を入射し、電界強度を変化させると、入射光に対する光吸収強度が変化する。この光吸収強度の変化を利用して光変調を行うことができる。

【0042】本発明の他の観点によると、電界無印加時において、前記量子箱に閉じ込められた電子及び正孔の各波動関数のピークを与える空間座標が3次元的に一致し、前記発光手段から放出される波長の光に関して、前記量子箱に電界を印加している時の前記量子箱による光吸収強度が、電界を印加していない時の光吸収強度よりも小さい光半導体装置が提供される。

【0043】電界無印加時に電子と正孔の波動関数のピークが一致するため、遷移確率が高くなり光吸収強度が大きくなる。電界を印加すると電子と正孔の波動関数のピークが反対方向に移動するため、波動関数の重なりが少なくなり遷移確率が低くなる。このため、光吸収強度が低下する。同時に、伝導帯及び価電子帯のバンド端が傾斜するためエネルギーギャップが狭くなり、吸収ピークが長波長側へ移動する。

【0044】電界印加時の光吸収強度が電界無印加時の光吸収強度よりも小さい波長域の光を被変調光とすると、電界無印加時に非透過状態になり、電界印加時に透過状態になる。

【0045】本発明の他の観点によると、前記発光手段により放出される光の波長が、前記量子箱による光吸収スペクトルのピークのうち最も長波長側のピークに対応する波長に、そのピークの半値幅の $1/2$ を加えた波長よりも短い光半導体装置が提供される。

【0046】光変調器を長距離伝送用の光信号発生源として使用するためには、光変調器の透過状態における挿入損失を少なくすることが望まれる。量子箱の光吸収スペクトルには、離散的な吸収ピークが現れるため、最も長波長側の吸収ピークよりも短波長側に、光吸収ピークの十分小さい波長域が存在する。

【0047】また、吸収ピークに対応する波長にそのピークの半値幅の $1/2$ を加えた波長よりも短い波長域の光に対しては、その吸収ピークを長波長側にシフトさせ

て光吸収強度を十分小さくすることができる。従って、この波長域の光を被変調光とすることが可能である。

【0048】本発明の他の観点によると、前記発光手段により放出される光の波長が、前記量子箱に電界を印加していない時における該量子箱の光吸収スペクトルのいずれかのピークの半値幅の範囲内の波長である光半導体装置が提供される。

【0049】電界無印加時の吸収ピークの半値幅の範囲内の光に対して、電界無印加時に比較的大きな光吸収強度を得ることができる。電界を印加すると吸収ピークがシフトする。電界強度を適当に選択することにより、光吸収強度を電界無印加時よりも小さくすることができる。

【0050】本発明の他の観点によると、電界無印加時において、前記量子箱に閉じ込められた電子及び正孔の各波動関数のピークを与える空間座標が、前記電界印加手段によって印加される電界の方向に関してずれており、前記発光手段から放出される波長の光に関して、前記量子箱に電界を印加している時の前記量子箱による光吸収強度が、電界を印加していない時の光吸収強度よりも大きい光半導体装置が提供される。

【0051】電界無印加時に電子と正孔の波動関数のピーク位置がずれているため、遷移確率が比較的低くなり、光吸収強度も小さい。波動関数のピーク位置が近く向きに電界を印加すると、遷移確率が高くなり、光吸収強度も大きくなる。

【0052】本発明の他の観点によると、前記発光手段により放出される光の波長が、前記量子箱に電界を印加していない時における該量子箱の光吸収スペクトルの相互に隣り合うピークの中間の波長である光半導体装置が提供される。

【0053】量子箱に、電子と正孔の波動関数のピーク位置が近づく向きに電界を印加すると、吸収ピークの高さが高くなると同時に、吸収ピークの中心波長が短波長側へシフトする。被変調光の波長を電界無印加時の隣り合う2つの吸収ピークの中間の波長とすると、電界無印加時に透過状態になる。適当な強さの電界を印加して吸収ピークを被変調光の波長域までシフトさせると、非透過状態になる。

【0054】

【発明の実施の形態】図1は、本発明の実施例による変調器集積分布帰還型レーザの一部破断斜視図を示す。n型InP基板1の表面の一部に回折格子3が形成されている。この基板1の上に、n型層2が成長され、その上に分布帰還型(DFB)レーザ14および光変調器15が分離領域16を介して形成されている。

【0055】DFBレーザ14は、回折格子3の上にn型クラッド層2、活性層4a、p型クラッド層5、p型層6、コンタクト層7aを積層して形成されている。光変調器15は、n型層2の上に量子箱を含む変調吸収層

4bを積層し、その上にp型層5、6、p型コンタクト層7bを積層して構成されている。

【0056】分離領域16は、積層構造上面からコンタクト層7a、7bの中間の領域を除去した構造で実現されている。なお、DFBレーザ14、光変調器15の整列方向に沿うように幅約1~3 μ mの基板に達するメサ構造がエッチングで形成され、メサ構造の側面は半絶縁性埋込ヘテロ領域8によって埋め戻されている。また、DFBレーザ14のコンタクト層7a上にはp側電極10aが形成され、光変調器15のコンタクト層7b上にはp側電極10bが形成されている。

【0057】また、ポリイミド領域9がp側電極10b周辺に形成され、その上に形成された配線層11がp側電極10bと接続されている。基板1の裏面にはn側電極12が共通に形成されている。

【0058】このような構造は、基板上への選択エピタキシャル成長、選択エッチング、メサ埋込成長、ポリイミド塗布、基板研磨、電極層堆積、パターンニング、へき開等の技術を用いて作製することができる。

【0059】このような構成において、DFBレーザ14は、単一波長の光を連続発振する。光変調器15は、DFBレーザ14から発する光を選択的に吸収し、変調した出力光を発生する。

【0060】次に、図2~図8を参照して、本発明の第1の実施例による光変調器について説明する。図2Aは、第1の実施例による光変調器の変調吸収層4b内に含まれる複数の量子箱の1つを模式的に示す。量子箱は、各面がx軸、y軸及びz軸に垂直な直方体形状を有する。なお、図2Aでは、直方体形状の量子箱を示すが、その他の形状、例えば円筒状、球状、楕円球状等の量子箱としてもよい。

【0061】図2Bは、量子箱のx軸、y軸及びz軸方向のエネルギー準位図を示す。各軸方向共、量子箱内の伝導帯の最低エネルギー準位がその周囲の最低エネルギー準位よりも低く、電子に対して量子井戸を形成している。また、量子箱内の価電子帯の最高エネルギー準位が、その周囲の最高エネルギー準位よりも高く、正孔に対して量子井戸を形成している。すなわち、量子箱は電子及び正孔に対して3次元量子閉じ込めを行い、電界無印加時において、閉じ込められた電子と正孔の波動関数のピークの3軸の空間座標がすべて一致する。これは、タイプIの量子井戸層に類似する構成である。

【0062】図2Cは、量子箱の光吸収スペクトルを示す。量子箱内のエネルギー準位が離散的に分布するため、入射光の波長に対して光吸収強度の吸収ピークも離散的に分布する。波長 λ_1 における吸収ピークが量子箱の最小のエネルギーギャップに相当し、それよりも長波長側にはピークが現れない。波長 λ_1 よりも短波長側に2番目、3番目のエネルギーギャップに相当する吸収ピークが現れている。

【0063】光変調器を構成する複数の量子箱がすべて同じ大きさで、かつ結晶性が良好であれば、光吸収強度の相互に隣り合う吸収ピークの間の光吸収強度は十分小さくなる。

【0064】参考のために、図2Dに電子及び正孔に対して1次元量子閉じ込めを行う量子井戸層及び2次元量子閉じ込めを行う量子細線の光吸収スペクトルを示す。この場合には、バンド端近傍にエネルギー準位が一定の幅をもってほぼ連続的に分布するため、離散的なピークが現れず、光吸収強度が階段状に変化する。従って、光変調器の挿入損失を小さくするためには、被変調光の波長を、吸収端の波長よりも長くする必要がある。

【0065】図2Cの場合には、光吸収スペクトルの吸収ピークの両側で光吸収強度が小さくなっているため、被変調光の波長を各吸収ピークの長波長側のみならず短波長側に設定してもよい。後に、図6~図8を参照して説明する方法で作製した量子箱の光吸収スペクトルを測定したところ、最も長波長側の吸収ピークと2番目の吸収ピークのそれぞれに対応する波長の光のエネルギー差は、約60meVであり、各吸収ピークの半値幅は約10meV程度であった。従って、2つの吸収ピークの間に光吸収強度の十分小さい波長域が存在する。この波長域の光を被変調光とすることができる。

【0066】波長が短くなると、相互に隣接する吸収ピーク間のエネルギー差が小さくなり、量子箱の周囲の材料のバンドギャップに相当する波長よりも短波長側では、エネルギー準位がほぼ連続的に存在するため、急峻な吸収ピークが現れない。従って、なるべく長波長側の吸収ピーク近傍の波長の光を被変調光とすることが好ましい。量子箱の大きさを小さくすれば、光吸収スペクトルの相互に隣接する吸収ピークに対応する波長の光のエネルギー差を大きくすることができる。

【0067】図3は、図2Aに示す量子箱の光吸収スペクトルの最も長波長側の吸収ピークの計算結果を示す。なお、量子箱の大きさを一辺15nmの立方体、量子箱の材料をGa_{0.415}In_{0.585}As_{0.890}P_{0.110}とし、量子箱の周囲の材料をGa_{0.146}In_{0.854}As_{0.318}P_{0.682}とした。また、ピーク形状を半値幅20/e² [meV]のガウシアン波形と仮定した。ここで、eは自然対数の底を表す。

【0068】電界無印加時には、波長1550nmを中心とする吸収ピークが現れる。図2Aのz軸方向に電界を印加しその強さを徐々に増加させると、吸収ピークの中心波長が長波長側にシフト（レッドシフト）するとともに、吸収ピークの高さが低くなる。レッドシフトするのは、量子箱のバンドギャップが小さくなるためである。また、吸収ピークの高さが低くなるのは電子と正孔の波動関数の重なりが少なくなるためである。

【0069】図4は、図3に示す光吸収スペクトルにおいて、印加電界を-150kV/cmから-100kV

／cmに変化させたときの光吸収強度の変化及び α パラメータを示す。横軸は波長を単位nmで表し、左縦軸は光吸収強度の変化を任意目盛りで表し、右縦軸は α パラメータを表す。図中の実線は光吸収強度を示し、記号■は α パラメータを示す。

【0070】波長が1580nm以下及び1640～1700nmの領域で α パラメータが負になっている。例えば、被変調光の波長を1550nmとすると、強さ-150kV/cmの電界を印加した時が透過状態、電界無印加時が非透過状態になる。このときの α パラメータは図4に示すように約-1.1である。

【0071】図5は、被変調光の波長を1550nmとしたときの電界強度に対する光吸収強度と α パラメータの変化を示す。横軸は電界強度を単位kV/cmで表し、左縦軸は光吸収強度を任意目盛りで表し、右縦軸は α パラメータを表す。図中の実線は光吸収強度を示し、記号■は α パラメータを示す。なお、 α パラメータは、電界強度を変化させたときの光吸収強度及び屈折率の変化により定まるため、計算した電界強度の2点の中心位置にプロットしている。

【0072】図4で説明したように、電界強度が-150kV/cmから-100kV/cmに変化する時の α パラメータが負になっている。このときの光吸収強度は比較的小さく、例えば印加電界を-150kV/cmとした時を透過状態に対応させることができる。電界強度が-50kV/cmから0kV/cmに変化する時の α パラメータは約+0.8である。この時の光吸収強度は大きく、例えば電圧無印加時を非透過状態に対応させることができる。

【0073】このように、透過状態時の α パラメータが負になるため、長距離伝送に適している。また、透過状態の光吸収強度も図3に示すように非常に小さく長距離伝送に適している。なお、非透過状態時の α パラメータが正になるが、この時には光パルス信号が出力されないため、信号伝送上の問題はない。

【0074】量子井戸層または量子細線で構成した光変調器の場合には、前述のように挿入損失を小さくするために被変調光の波長を光吸収スペクトルの吸収端よりも長くする必要がある。これに対し、量子箱で構成した光変調器の場合には、例えば図3で説明したように、被変調光の波長を電界無印加時の吸収端（図3では約1650nm）よりも短波長とすることができる。

【0075】また、量子箱で構成した光変調器は、光吸収強度が最大になる時すなわち電子と正孔の波動関数の重なりが最大になる状態の時に非透過状態になる。これに対し、1次元量子閉じ込めを行うタイプIの量子井戸層を用いる場合には、量子井戸層に電界を印加している状態、すなわち電子と正孔の波動関数の重なりが少なくなり光吸収強度が小さい状態を非透過状態としている。従って、量子箱を用いることにより量子井戸層を用いる

場合に比べて、非透過状態の時の減衰量を大きくすることができる。このため、光変調器を小型化することが可能になる。

【0076】量子箱をレーザダイオードとして用いる場合には、電子と正孔が量子箱に捕獲されるまでに比較的長時間を必要とすることが大きな問題になる。しかし、電界吸収による電子正孔対の生成プロセスは十分速いため、レーザダイオードの場合のような捕獲時間による動作速度の制限はない。

【0077】上述の例では、被変調光の波長を1550nmとしたが、その他の波長としてもよい。例えば、電界を印加したときの光吸収強度が電界無印加時の光吸収強度よりも小さくなる波長域から選択してもよい。図3の場合を例にとると、波長1600nm以下の波長域において、強さ-150kV/cmの電界を印加した時の光吸収強度が電界無印加時の光吸収強度よりも小さい。図4に示すように、この波長域において、 α パラメータは負になるかまたは正になる場合であっても0.2以下と比較的小さくなるため長距離伝送に適している。

【0078】また、被変調光の波長を電界無印加時の光吸収スペクトルの最も長波長側の吸収ピークに対応する波長に、その吸収ピークの半値幅の1/2を加えた波長よりも短い波長域から選択してもよい。図3の場合を例にとると、波長1585nm以下の波長域に相当する。

【0079】図3では、光吸収スペクトルの最も長波長側の吸収ピークのレッドシフトを利用する場合を示したが、他の吸収ピークのレッドシフトを利用してもよい。この場合、透過状態と非透過状態における十分な光吸収強度の差を確保するために、被変調光の波長を電界無印加時の吸収ピークの半値幅の範囲内の波長とすることが好ましい。

【0080】次に、図6～図8を参照して、図2Aに示す量子箱を作製する方法を説明する。図6は、量子箱を含む半導体積層構造を示す。GaAs基板31上にGaAsバッファ層32、散点状に配置された量子箱35を有するInGaAs層33、及びGaAsキャップ層34がそれぞれエピタキシャル成長されている。量子箱を含む半導体積層構造は、このように量子箱35を有する層（以下、「量子箱層」と呼ぶ）33が、バッファ層32とキャップ層34との間に挟まれた構造を有する。

【0081】図7は、図6に示す半導体積層構造を形成するための減圧MOCVD（有機金属化学気相成長）装置の概略を示す。ただし、結晶成長は、原料交互供給で行う。なお、ALE（原子層エピタキシャル成長）で行ってもよい。反応容器40の下方にガス流路45が開口し、ガス流路45から反応容器40内に反応ガスが導入される。反応容器40内に導入された反応ガスは反応容器40の上方に設けられたガス排気管44から外部に排気される。

【0082】反応容器40内にはサセプタ41が配置さ

れ、ガス流路45の開口部に対向する位置に基板31が保持される。反応容器40の周囲にはサセプタ41を取り囲むように高周波コイル42が配置されており、サセプタ41及び基板31を高周波加熱することができる。

【0083】ガス流路50からガス供給系にキャリアガス及びパージガスとして H_2 ガスが供給される。ガス流路50から分岐した H_2 ガス、及びガス流路50から分岐しTMIDMEA（トリメチルインジウムジメチルエチルアミンアダクト）をバブリングした H_2 ガスがそれぞれマスフローコントローラMFCを通してガス流路51に供給される。

【0084】同様に、ガス流路50から分岐した H_2 ガス、及びTMG（トリメチルガリウム）をバブリングした H_2 ガスがそれぞれマスフローコントローラMFCを通してガス流路52に供給される。

【0085】ガス流路51、52はガス切り換えバルブ55の入力側に接続されている。ガス切り換えバルブ55の出力側は、反応容器40に反応ガスを供給するためのガス流路45及び排気用ガス流路57に接続されている。ガス切り換えバルブ55でガス流路を切り換えることにより、ガス流路45にTMIDMEAを含んだ H_2 ガスあるいはTMGを含んだ H_2 ガス、またはその両方を供給することができる。また、両方のガスを排気用ガス流路57に排気することもできる。

【0086】ガス流路50から分岐した H_2 ガスがマスフローコントローラMFCを介してガス流路53に供給される。また、ガス流路50から分岐した H_2 ガス、及び AsH_3 （アルシン）がそれぞれマスフローコントローラMFCを通してガス流路54に供給される。

【0087】ガス流路53、54はガス切り換えバルブ56の入力側に接続されている。ガス切り換えバルブ56の出力側は、ガス切り換えバルブ55と同様にガス流路45及び排気用ガス流路58に接続されている。ガス切り換えバルブ56でガス流路を切り換えることにより、ガス流路45にパージ用 H_2 ガスあるいは AsH_3 と H_2 の混合ガスを供給することができる。

【0088】次に、図7に示す減圧MOCVD装置を使用して図6に示す積層構造を形成する方法について説明する。まず、GaAs基板31をサセプタ41上に保持する。パージガスとして H_2 ガスを流しながら高周波コイル42でサセプタ41を加熱し、基板温度を460℃とする。なお、反応容器40内の圧力が2000Paとなるように排気量を制御する。

【0089】基板温度が460℃となったところでTMGを含む H_2 ガスを流量25sccm、 AsH_3 と H_2 の混合ガスを流量100sccmの条件で供給し、厚さ100nmのGaAsバッファ層32をMOCVDで堆積する。

【0090】次に、TMIDMEA、TMG及び AsH_3 を時間的に切り換えて供給し、厚さ7nmのInGa

As量子箱層33を堆積する。図8は、TMIDMEA、TMG及び AsH_3 の供給のタイムチャートを示す。まず、 H_2 ガスを0.5秒間流し反応容器40内をパージする。続いて、TMIDMEAをバブリングした H_2 ガスを流量200sccmの条件で1.0秒間、続いてTMGをバブリングした H_2 ガスを流量35sccmの条件で0.1秒間供給する。 H_2 ガスを0.5秒間供給し反応容器40内をパージする。続いて、 AsH_3 と H_2 の混合ガスを流量400sccmの条件で10秒間供給する。

【0091】上記ガス供給シーケンスを1サイクルとしてガス供給を12サイクル繰り返す。続いて、GaAsバッファ層32の形成と同一の条件で厚さ100nmのGaAsキャップ層34を堆積する。なお、有機金属材料として他の原料ガスを用いることも可能である。

【0092】TMIDMEA、TMG、及び AsH_3 を時間的に分割して供給すると、通常、形成されるInGaAsは各構成元素の原料ガスの供給時間等によって特定されるIn組成となる。

【0093】GaAsバッファ層の上にInGaAsを堆積する場合に、全面にIn組成が均一のInGaAs層が形成されるとすると、格子不整合のためInGaAs層に面内方向の歪が発生する。このようにInGaAs層全面に歪が発生するよりも、広い領域で下地のGaAsバッファ層と格子定数がほぼ整合するIn組成の少ない領域が形成され、局所的にIn組成の多い領域が散点状に形成される方が歪エネルギーが低くなると考えられる。また、このIn組成が多い領域が球状に近いほど歪エネルギーが低くなると考えられる。

【0094】上記のような理由から、図6に示すようにIn組成の少ない領域の中にIn組成の多い島状領域が散点状に形成されたと考えられる。上記条件で積層構造を形成したところ、直径約10nmの島状領域が形成された。このIn組成の多い島状領域は、周囲のIn組成の少ない領域及び上下のGaAsバッファ層及びGaAsキャップ層に比べてエネルギーギャップが小さいため、キャリアに対して3次元的な量子井戸として働く。

【0095】図8では、In原料、Ga原料、As原料をこの順番で供給する場合について示したが、その他の順番で供給してもよい。例えば、Ga原料とIn原料を供給する順番を逆にしてもよい。また、In原料の供給とGa原料の供給の間にさらにAs原料を供給してもよい。

【0096】また、図8では、Ga原料の供給からAs原料の供給への切替え時及びAs原料の供給からIn原料の供給への切替え時にパージ用の水素ガスを供給する場合について示したが、他の原料切り替え時にパージ用の水素ガスを供給してもよい。

【0097】また、ガス供給サイクルの繰り返し回数は12回に限らない。なお、ガス供給サイクルを6回以上

繰り返すことが好ましく、さらには10～24回繰り返すことが好ましい。

【0098】また、量子箱層の成長温度を460℃とする場合について説明したが、その他の温度としてもよい。成長温度の好適な範囲は250℃～600℃、より好適な範囲は420℃～500℃である。

【0099】次に、図9～図11を参照して、本発明の第2の実施例による光変調器について説明する。図9Aは、第2の実施例による光変調器の変調吸収層4bに含まれる複数の量子箱の1つを模式的に示す。電子に対して3次元量子閉じ込めを行う量子箱Qeと、正孔に対して3次元量子閉じ込めを行う量子箱Qhがz軸方向に並んで配置されている。図9Aでは、量子箱Qe、Qhが直方体形状の場合を示しているがその他の形状でもよい。

【0100】図9B及び図9Cは、それぞれ量子箱Qe及びQhを横切る位置におけるx軸及びy軸方向に関するエネルギー準位図を示す。図9Dは、z軸方向に関するエネルギー準位図を示す。量子箱Qeの伝導帯のエネルギー準位はその周囲のエネルギー準位よりも低いため、量子箱Qe内に電子が閉じ込められる。量子箱Qeの価電子帯のエネルギー準位はその周囲のエネルギー準位よりも低い（正孔に対してはエネルギー準位が高い）ため、量子箱Qe内に正孔は閉じ込められない。同様に、量子箱Qh内には、正孔が閉じ込められ、電子は閉じ込められない。

【0101】図9Dに示すように、量子箱Qeと量子箱Qhのz軸方向の位置がずれている。従って、量子箱Qeに閉じ込められた電子の波動関数と量子箱Qhに閉じ込められた正孔の波動関数とは、z軸方向に関するピークの位置を異にする。量子箱QeとQhは、z軸方向に関して、タイプIIの量子井戸構造に類似する。

【0102】図10は、図9Aの量子箱にz軸方向の電界を印加した時の光吸収スペクトルの最も長波長側の吸収ピークの計算結果を示す。すなわち、量子箱Qeの伝導帯の最低エネルギー準位と量子箱Qhの価電子帯の最高エネルギー準位との間の遷移に対応する吸収吸収ピークである。この吸収ピークよりも短波長側には、他のエネルギー準位間の遷移に対応する吸収ピークが現れる。

【0103】なお、量子箱QeとQhのx軸及びy軸方向の長さを15nm、量子箱Qeのz軸方向の長さを9nm、量子箱Qhのz軸方向の長さを4.5nmとし、量子箱Qeの材料をGa_{0.084}In_{0.916}As_{0.652}P_{0.348}、量子箱Qhの材料をGa_{0.708}In_{0.292}As_{0.769}P_{0.231}、量子箱の周囲の材料をGa_{0.573}In_{0.427}As_{0.774}P_{0.226}とした。また、吸収ピークの形状は、図3の場合と同様に半値幅20/e²meVのガウシアン波形と仮定した。

【0104】2番目の吸収ピークは、図10に示す1番目の吸収ピークから十分離れた位置に現れるため、1番目の吸収ピークの短波長側に光吸収強度の十分小さな波

長域が存在する。

【0105】電界無印加時には、波長約1625nmを中心とした弱い吸収ピークが現れる。量子箱に閉じ込められた電子及び正孔の波動関数の重なりが大きくなる向き（z軸の正の向き）の電界を印加して、その強さを徐々に大きくすると、吸収ピークの中心波長が短波長側にシフト（ブルーシフト）し、その高さが高くなる。

【0106】吸収ピークの高さが高くなるのは、電子と正孔の波動関数の重なりが大きくなり遷移確率が高くなったためである。吸収ピークの中心波長がブルーシフトするのは、伝導帯及び価電子帯のバンド端が傾きエネルギーギャップが大きくなったためである。

【0107】電界無印加時の1番目の吸収ピークの短波長側に光吸収強度の十分小さな波長域が存在するため、この波長域の光、例えば波長1550nmの光を被変調光とすることができる。

【0108】図11は、被変調光の波長を1550nmとしたときの、光吸収強度及びαパラメータを電界強度に関して示す。横軸は電界強度を単位kV/cmで表し、左縦軸は光吸収強度を任意目盛りで表し、右縦軸はαパラメータを表す。図中の実線は光吸収強度を示し、記号■はαパラメータを示す。

【0109】電界強度を0kV/cmから50kV/cmに変化させたときのαパラメータは約-0.5である。この時の光吸収強度は比較的小さく、例えば電界無印加時の状態を透過状態に対応させることができる。電界強度を100kV/cmから150kV/cmに変化させたときのαパラメータは約+0.2である。この時の光吸収強度は比較的大きく、例えば強さ150kV/cmの電界を印加した状態を非透過状態に対応させることができる。

【0110】このように、透過状態におけるαパラメータが負になるため、長距離伝送に適している。第2の実施例による光変調器の場合には、第1の実施例による光変調器の場合とは異なり、電界を印加している時に非透過状態になる。従って、電界を印加している時に量子箱内に電子正孔対が生成される。生成された電子と正孔は、印加されている電界によって移動し、量子箱内から速やかに除去される。このように、第2の実施例による光変調器では、生成した電子正孔対を効率的に量子箱内から除去することができる。

【0111】図11では、被変調光の波長を1550nmとした場合を示したが、その他の波長としてもよい。例えば、電界無印加時に相互に隣り合う吸収ピークの中間の波長域としてもよい。適当な強さの電界を印加すると吸収ピークがブルーシフトして被変調光に対する光吸収強度が大きくなり、非透過状態になる。

【0112】上記第2の実施例では、最も長波長側の吸収ピークのブルーシフトを利用した場合を説明したが、その他の吸収ピークのブルーシフトを利用してもよい。

2番目以降の吸収ピークのブルーシフトを利用するためには、2番目以降の吸収ピークとその次の吸収ピークとの間のエネルギー差をなるべく大きくすることが好ましい。

【0113】吸収ピーク間のエネルギー差を大きくするためには、量子箱の大きさを小さくすればよい。しかし、図9Aにおいて量子箱のz軸方向の長さを短くすると電界印加時の吸収ピークのブルーシフト量が少なくなってしまう。従って、xy面内の大きさを小さくすることが好ましい。

【0114】次に、図12A~12Cを参照して、図9Aに示す量子箱を作製する方法を説明する。図12Aに示すように、InP基板61の表面上に、例えばMOCVDにより、バリア層62、正孔用量子箱層63、電子用量子箱層64、バリア層65を堆積する。バリア層62及び65はGa_{0.573}In_{0.427}As_{0.774}P_{0.226}からなる層である。正孔用量子箱層63は、Ga_{0.708}In_{0.292}As_{0.769}P_{0.231}からなる厚さ4.5nmの層である。電子用量子箱層64は、Ga_{0.084}In_{0.916}As_{0.652}P_{0.348}からなる厚さ9nmの層である。

【0115】バリア層65の表面上に、電子ビーム露光を用いてSiO₂からなるマスクパターン66を形成する。マスクパターン66は、例えば一辺の長さが10~50nmの矩形形状を有する。

【0116】図12Bに示すように、マスクパターン66をエッチングマスクとしてバリア層65からバリア層62までの積層構造をエッチングする。エッチングは、例えばエッチングガスとしてC₂H₆とH₂の混合ガスまたはCH₄とH₂の混合ガスを用いたリアクティブイオンエッチング(RIE)により行う。このようにして、バリア層62a、正孔用量子箱63a、電子用量子箱64a、バリア層65a及びマスクパターン66からなるメサ67が形成される。

【0117】図12Cに示すように、MOCVDにより、マスクパターン66の表面上には成長せず、InP基板61の表面上にのみ成長する条件で、バリア層62a及び65aと同一組成のバリア層67を堆積する。バリア層67の上面が少なくとも電子用量子箱64aの上面よりも高くなるような構成とする。

【0118】このようにして、上下をバリア層62aと65a、側方をバリア層67で囲まれた図9Aに示す量子箱を形成することができる。以上実施例に沿って本発明を説明したが、本発明はこれらに制限されるものではない。例えば、種々の変更、改良、組み合わせ等が可能なことは当業者に自明であらう。

【0119】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、3次元量子閉じ込めを行う量子箱で光変調器を構成することにより、長距離伝送に適したαパラメータを有し、

かつ透過状態のときの挿入損失の少ない光変調器を得ることができる。連続発光する光源とこの光変調器とを組み合わせ、長距離伝送に適した光半導体装置を作製することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施例による変調器集積分布帰還型レーザの一部破断斜視図である。

【図2】図2Aは、本発明の第1の実施例による光変調器を構成する量子箱を模式的に表した図、図2Bは量子箱のエネルギー準位図、図2Cは、量子箱の光吸収スペクトルを表すグラフ、図2Dは、従来の量子井戸層の光吸収スペクトルを表すグラフである。

【図3】図2Aに示す量子箱の光吸収スペクトルの最も長波長側の吸収ピークを表すグラフである。

【図4】図2Aに示す量子箱の光吸収強度の変化及びαパラメータを波長に関して表すグラフである。

【図5】図2Aに示す量子箱の光吸収強度及びαパラメータを電界強度に関して表すグラフである。

【図6】量子箱を有する半導体積層構造を示す断面図である。

【図7】図6に示す半導体積層構造を形成するための減圧MOCVD装置を表す図である。

【図8】図6に示す半導体積層構造を形成するための反応ガスの供給タイムチャートである。

【図9】図9Aは、本発明の第2の実施例による光変調器を構成する量子箱を模式的に表した図、図9B~9Dは量子箱のエネルギー準位図である。

【図10】図9Aに示す量子箱の光吸収スペクトルの最も長波長側の吸収ピークを表すグラフである。

【図11】図9Aに示す量子箱の光吸収強度及びαパラメータを電界強度に関して表すグラフである。

【図12】図9Aに示す量子箱の製造方法を説明するための積層構造の一部破断斜視図である。

【図13】従来のタイプIの量子井戸構造を説明するためのエネルギーバンド図、及び波動関数を表すグラフである。

【図14】従来のタイプIの量子井戸構造の光吸収スペクトルを表すグラフである。

【図15】光パルス信号発生源のαパラメータと最大伝送距離との関係を示すグラフである。

【図16】従来のタイプIの量子井戸構造の光吸収強度変化、屈折率変化、及びαパラメータを波長に関して表したグラフである。

【図17】従来のタイプIIの量子井戸構造を説明するためのエネルギーバンド図、及び波動関数を表すグラフである。

【符号の説明】

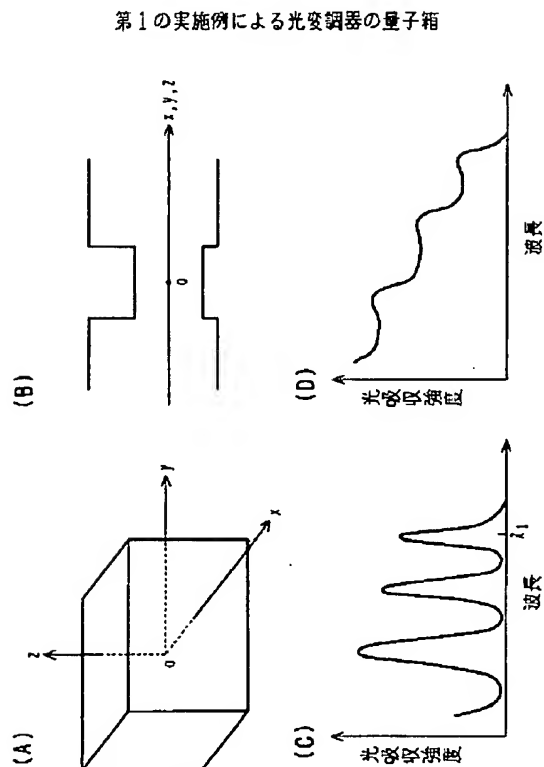
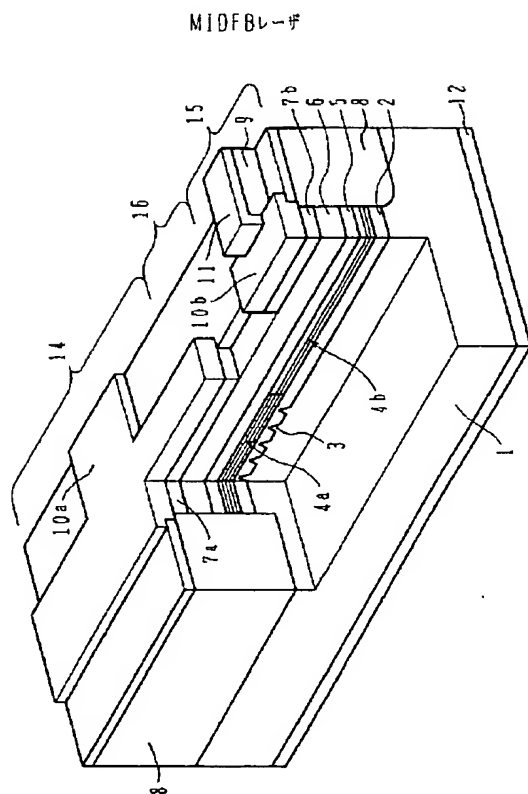
- 1 半導体基板
- 2 n型領域
- 3 分布帰還用回折格子

- 4 a レーザ活性層
- 4 b 変調吸収層
- 6、7 p型領域
- 8 半絶縁性埋込領域
- 9 ポリイミド領域
- 10 p側電極
- 11 配線
- 12 n側電極
- 14 DFBレーザ
- 15 光変調器
- 16 分離領域
- 31 基板
- 32 バッファ層
- 33 量子箱層

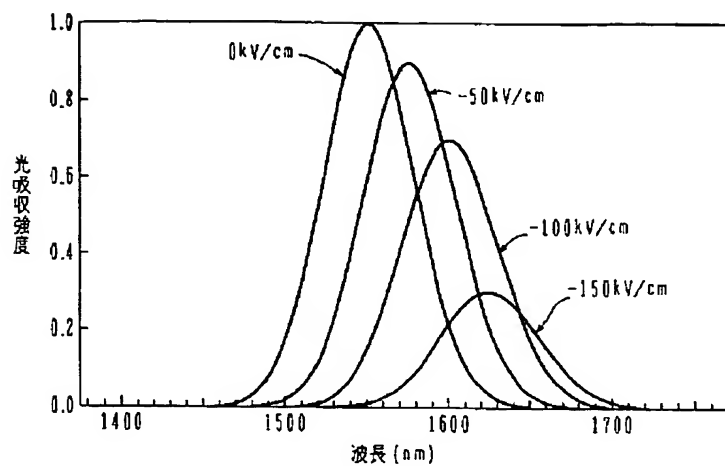
- 34 キャップ層
- 35 量子箱
- 40 反応容器
- 41 サセプタ
- 42 高周波コイル
- 44 ガス排気管
- 45、50、51、52、53、54 ガス流路
- 55、56 ガス切り換えバルブ
- 57、58 排気用ガス流路
- 61 InP基板
- 62、65、67 バリア層
- 63 正孔用量子箱層
- 64 電子用量子箱層
- 66 マスクパターン

【図1】

【図2】

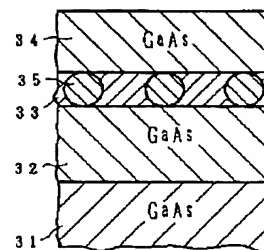


【図3】

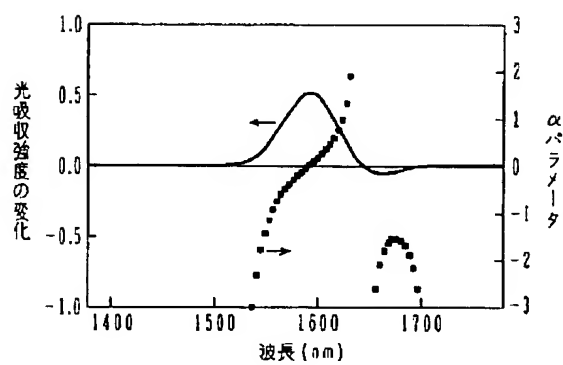


【図6】

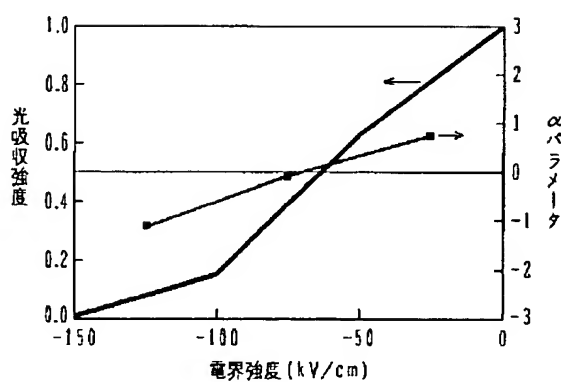
量子箱を含む積層構造



【図4】

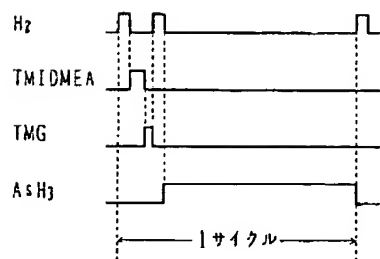


【図5】

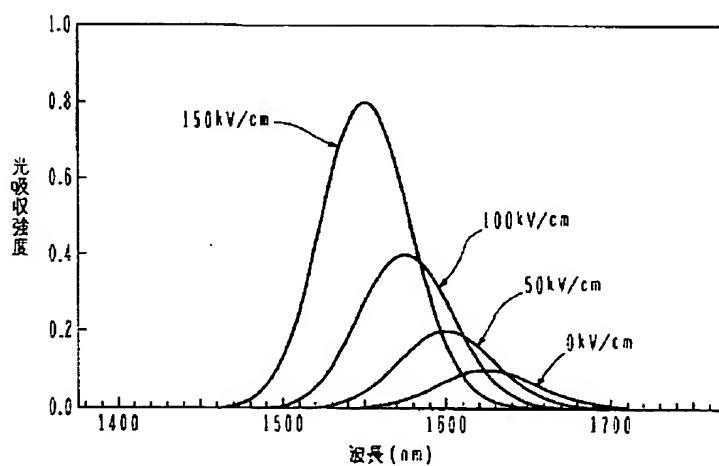


【図8】

反応ガス供給タイムチャート

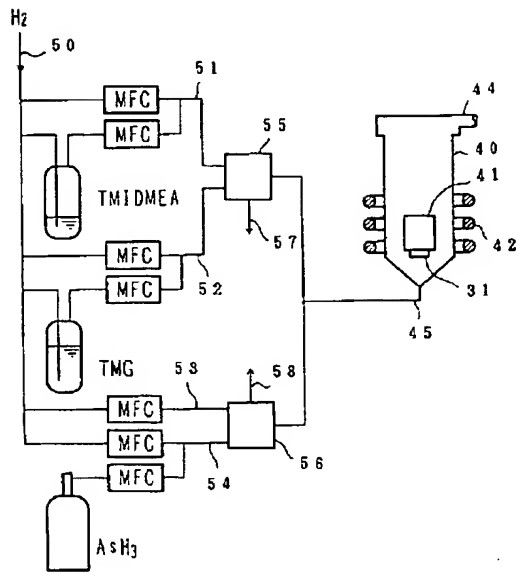


【図10】



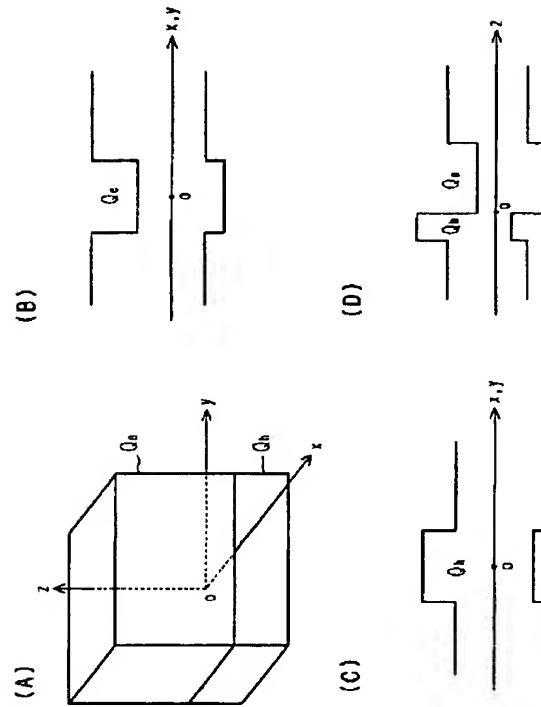
【図7】

減圧MOCVD装置

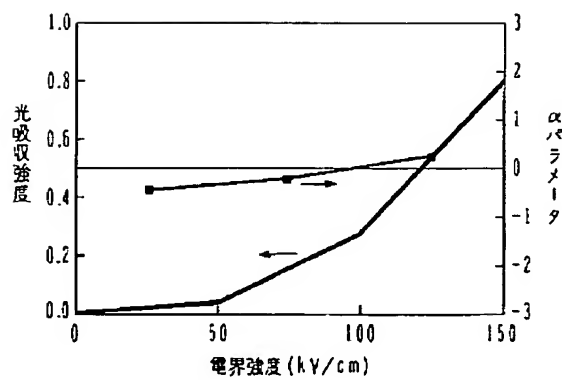


【図9】

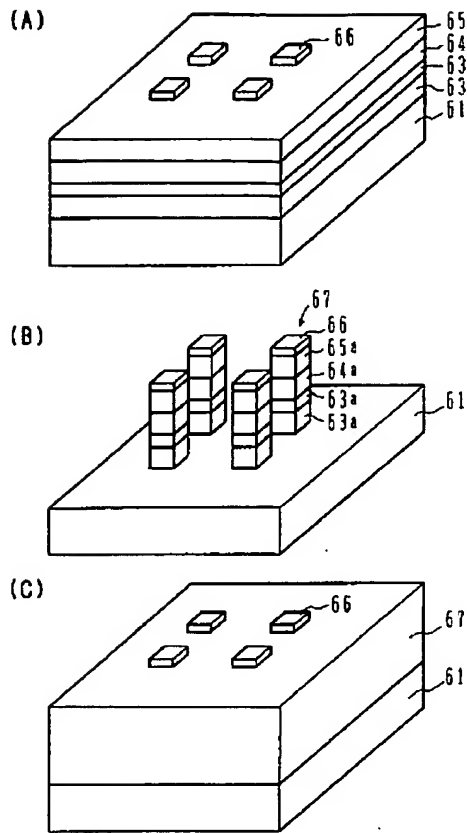
第2の実施例による光変調器の量子箱



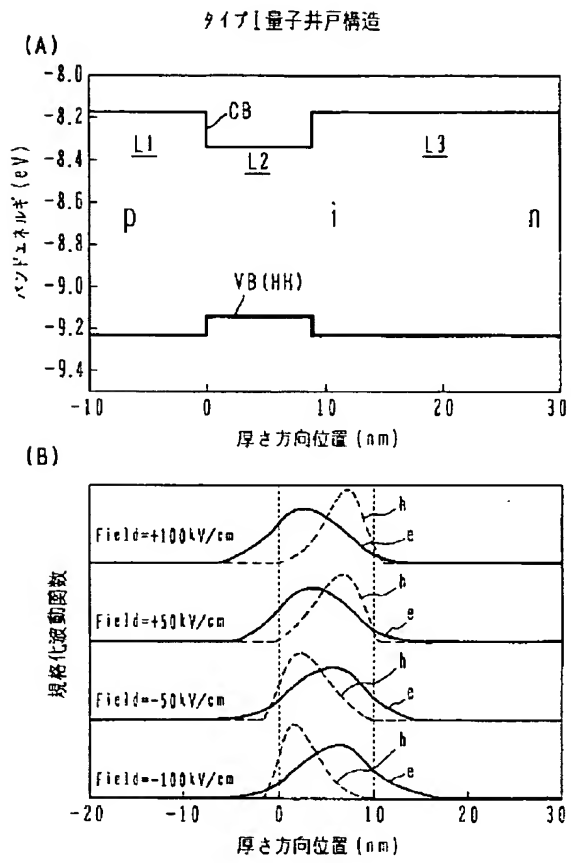
【図11】



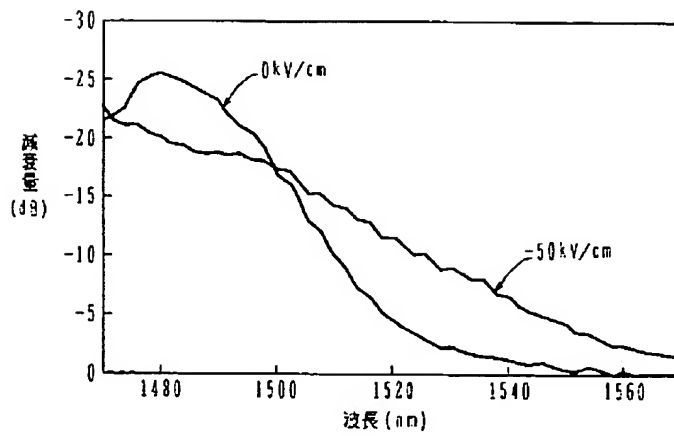
【図12】



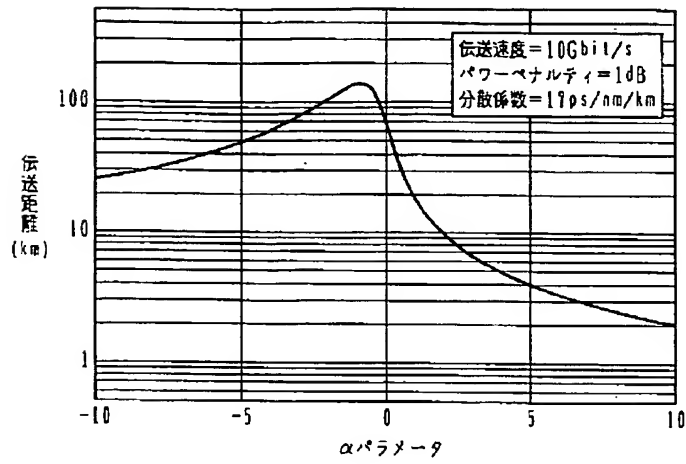
【図13】



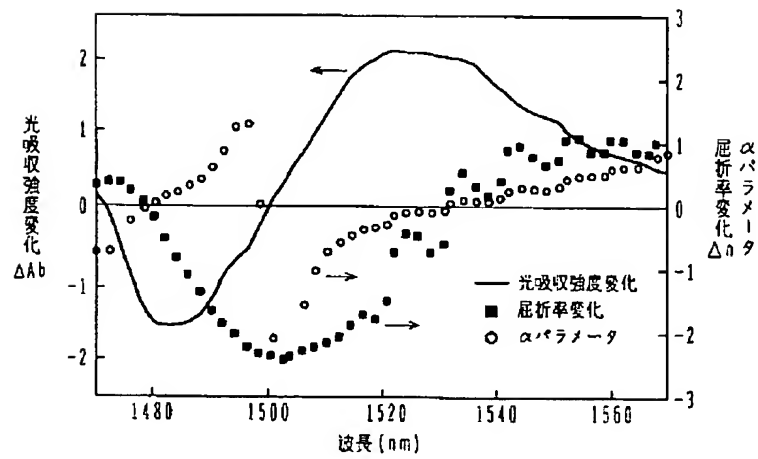
【図14】



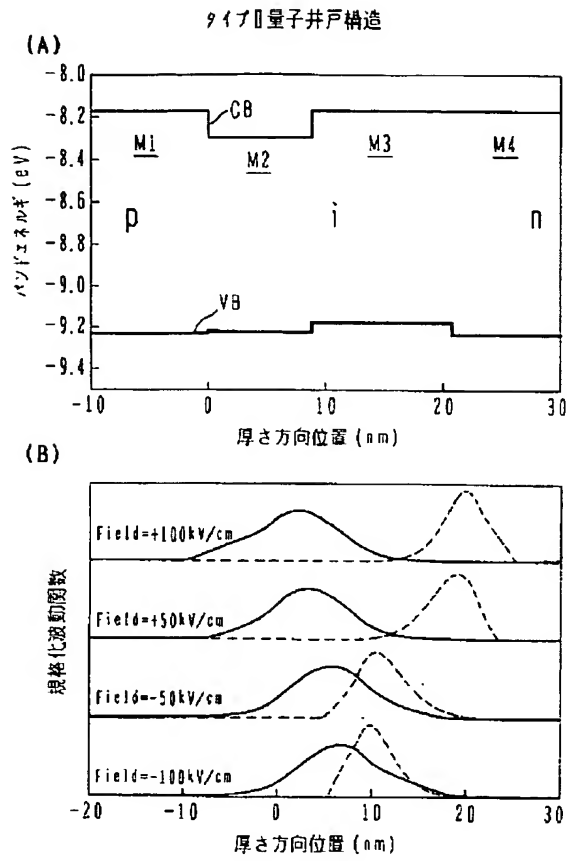
【図15】



【図16】



【図 17】



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☒ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.